



РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ВЗРЫВОМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЬЦЕВЫХ ШВАХ ТРУБОПРОВОДОВ

А. Г. БРЫЗГАЛИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Снижение остаточных напряжений в кольцевых швах трубопроводов представляет собой трудоемкий и дорогостоящий процесс. Обработка взрывом в качестве альтернативы термообработке обеспечивает существенное снижение затрат времени и средств. Разработан расчетно-экспериментальный метод определения режимов обработки взрывом кольцевых швов труб различного типоразмера. Метод основан на использовании общего вида зависимости деформации стенки цилиндрической оболочки от внешней статической нагрузки, полученной в рамках теории упругости, применительно к решению задачи определения величины динамической нагрузки, необходимой для создания пластических деформаций, обеспечивающих снижение остаточных напряжений в кольцевых швах труб. На основе этого метода выведены зависимости для расчета основных параметров обработки взрывом. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие пригодность полученных зависимостей для практического использования без участия разработчиков технологии. Библиогр. 13, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: обработка взрывом, термообработка, остаточные напряжения, деформации, кольцевой шов, трубопроводы

Остаточные сварочные напряжения (ОН) от кольцевых швов могут существенным образом снизить работоспособность трубопроводов, работающих в условиях низких температур, воздействия агрессивной среды и других неблагоприятных факторов [1, 2]. Снижение ОН осуществляется с помощью термообработки, являющейся дорогостоящей и трудоемкой технологией [3]. Альтернативой термообработке может служить обработка взрывом (ОВз), обеспечивающая на порядок меньшую себестоимость и высокую производительность.

Технология ОВз нашла широкое применение для обеспечения надежности и долговечности технологических трубопроводов глиноземного производства и газовых месторождений с повышенным содержанием сероводорода, осуществляющих транспортировку коррозионноактивной среды, вызывающей растрескивание кольцевых сварных швов. Уникальный опыт применения ОВз для предотвращения лавинообразного растрескивания получен при прокладке газопровода Таас-Тумус-Якутск, на котором было обработано 295 монтажных стыков, выполненных ручной дуговой сваркой в трассовых условиях. Отсутствие повреждений обработанных стыков газопровода, в том числе в крайне суровых зимних условиях, свидетельствует об эффективности применения ОВз конструкций, работающих при низких температурах. Очевидным преимуществом ОВз перед термообработкой является отсутствие необходимости в использовании специального оборудования и источников

энергии. Технология может быть использована не только при монтаже трубопроводов, но и при выполнении оперативных задач по ремонту и замене поврежденных участков.

Оперативный выбор режимов ОВз кольцевых швов труб имеет важное практическое значение, особенно в тех случаях, когда его точность обеспечивает выбор режимов, близких к оптимальным, позволяя избежать применения дорогостоящих экспериментальных исследований.

Рассмотрим особенности процесса ОВз зарядами, представляющими собой некоторое количество витков детонирующего шнура (ДШ), расположенных на наружной поверхности трубы вблизи шва. На рис. 1, а приведена обобщенная эпюра упругих тангенциальных деформаций стенки трубы от кольцевого шва. Нагрузка от взрывного воздействия в принятой схеме считается равномерно распределенной и должна быть приложена к зоне действия ОН сжатия [4] (участок АВ, рис. 1, б). Поперечное сечение заряда из ДШ показано на рис. 1, в в виде кружков.

Для однозначного определения режима ОВз кольцевого шва трубы известного типоразмера необходимо найти массу заряда m , ширину заряда a и расстояние от оси обрабатываемого кольцевого шва до ближнего к нему края заряда b [5]. Масса заряда определяет величину создаваемой взрывом деформации стенки трубы, следовательно, выбор ее должен зависеть от сопротивляемости трубы деформированию, т. е. от цилиндрической жесткости (геометрических параметров)



и предела текучести материала. Параметры заряда a и b определяют местоположение создаваемых деформаций.

Известны как аналитические, так и численные методы решения динамических задач [6, 7]. Эти методы, как и формы представления получаемых с их помощью решений, обычно весьма громоздки, трудны для анализа и требуют использования в каждом конкретном случае уточняющих экспериментов. Представляется целесообразным, используя имеющиеся результаты расчетных исследований и накопленный опыт практических приемов подбора параметров заряда, разработать достаточно простой инженерный метод, позволяющий оперативно рассчитывать оптимальные значения параметров ОВз кольцевых швов труб различных типоразмеров.

Учитывая, что окружные напряжения (эксплуатационные и сварочные) в трубопроводах как правило существенно выше осевых, а также то, что ОВз заведомо приводит к снижению осевых остаточных сварочных напряжений [7], в настоящей работе исследовали распределение в швах только окружных ОН.

Расчет ширины заряда. Причиной появления остаточных деформаций и напряжений в сварном соединении является образование пластической деформации укорочения в процессе сварочного нагрева, ширину зоны которой обозначим как $b_{\text{п}}$. Ширина заряда a должна быть такой, чтобы обеспечить деформирование стенки трубы в зоне образования упругих сварочных деформаций сжатия, т. е. равна ширине отрезка $[AB]$ (рис. 1). Таким образом, параметр ОВз b должен быть равен $b_{\text{п}}$, положение точки A соответствует координате $x = b_{\text{п}}$, положение точки B определяется координатой перехода в нуль эпюры сварочных упругих деформаций сжатия. Дальнейшее увеличение ширины заряда не приведет к заметному повышению эффективности ОВз, хотя и не создаст каких-либо негативных последствий кроме перерасхода ДШ и времени на монтаж заряда.

Практика измерения ОН в трубах показывает, что ширина этой зоны даже для труб одного типоразмера может различаться, так как зависит от условий выполнения сварки кольцевого шва, условий изготовления самой трубы, погрешности измерения и других факторов. В то же время многочисленные экспериментальные исследования и промышленное использование ОВз свидетельствуют о том, что применяемая схема ОВз обеспечивает высокую эффективность даже при некоторых отклонениях выбранной ширины заряда от принимаемой в рассмотренной схеме. Это свидетельствует о том, что даже при самой корректной теоретической постановке задачи точность расчетных данных может быть нивелирована слу-

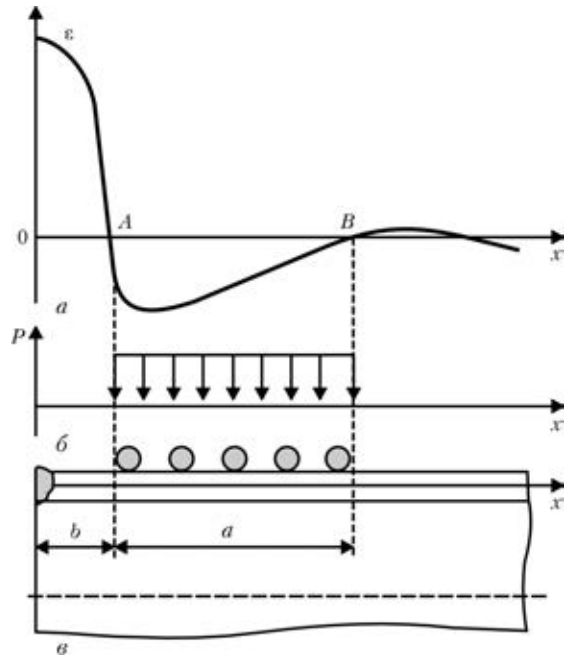


Рис. 1. Схема расположения заряда при ОВз: a — обобщенная эпюра тангенциальных остаточных упругих деформаций; $б$ — распределение нагрузки от взрывного воздействия; $в$ — расположение заряда из ДШ

чайными факторами, которые невозможно учесть в расчетной модели.

В связи с этим выберем простейшую схему расчета ширины зоны деформаций сжатия.

Действие сварного шва на остальную трубу будем моделировать равномерно распределенной по окружности поперечного сечения трубы и сосредоточенной в направлении продольной оси x внешней сжимающей нагрузкой P (рис. 2). При такой постановке задачи условно считается, что $b_{\text{п}} = 0$.

Уравнение изогнутой оси оболочки для данного случая принимает вид [8]:

$$w = 0,125Pe^{-\beta x}(\sin\beta x + \cos\beta x)/D_{\beta}\beta^3. \quad (1)$$

где $\beta = [3(1 - \nu^2)/R^2h^2]^{0,25}$ — вспомогательный геометрический параметр трубы; ν — коэффициент

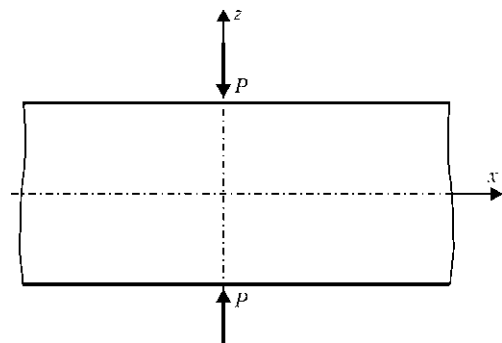


Рис. 2. Схема расчета ширины заряда для ОВз кольцевого шва труб: P — распределенная по кольцу нагрузка; x — расстояние вдоль образующей трубы от места приложения нагрузки



ент Пуассона; R — радиус; h — толщина; $D_\beta = Eh^3/12(1-\nu^2)$ — цилиндрическая жесткость оболочки; E — модуль упругости стали обрабатываемой трубы.

Ширину заряда ОВз определим по координате точки x , при которой $w = 0$:

$$\sin\beta x + \cos\beta x = 0.$$

Поскольку нас интересует только первый положительный корень уравнения (1), окончательно найдем:

$$a = x|_{w=0} = 0,75\pi/\beta, \quad (2)$$

или в более простом виде

$$a = 1,8 \sqrt{Rh}. \quad (3)$$

Определение массы заряда. Масса заряда равна массе взрывчатого вещества (ВВ) в ДШ и может быть выражена следующим образом:

$$m = 2\pi Rnj, \quad (4)$$

где n — количество витков ДШ; j — погонная навеска ВВ в ДШ.

Учитывая то, что заряды для ОВз кольцевых швов труб изготавливаются из ДШ, который характеризуется весьма стабильными детонационными характеристиками, можно принять, что динамический предел текучести σ_T^d пропорционален статическому пределу текучести σ_T :

$$\sigma_T^d = K\sigma_T. \quad (5)$$

Допустим также, что в момент появления первых пластических деформаций под зарядом данные расчета трубы как упругой статической оболочки окажутся достаточно достоверными, несмотря на динамический характер решаемой задачи.

Рассмотрим следующую задачу (рис. 3). Бесконечно длинная труба в некоторой своей части шириной a нагружена по кольцу равномерно распределенной нагрузкой p (рис. 1, б). Рассечем эту трубу по плоскостям $x = 0,5a$ и $x = -0,5a$ на три части, а действие их друг на друга уравновесим распределением изгибающих моментов M и перерезывающих сил Q , действующих в этих сечениях.

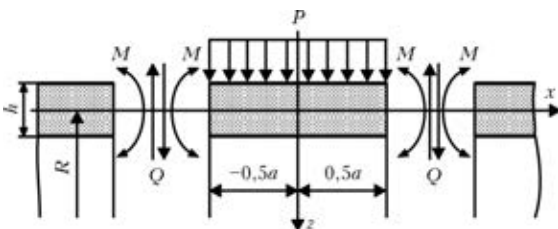


Рис. 3. Расчетная модель для определения величины заряда

Функции прогиба оболочек находятся путем решения дифференциального уравнения симметричной деформации круговой цилиндрической оболочки с постоянной толщиной [8]:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{p}{D_\beta} \quad (6)$$

и имеют вид

$$w_1 = e^{-\beta x}(C_1 \cos\beta x + C_2 \sin\beta x) + e^{\beta x}(C_3 \cos\beta x + C_4 \sin\beta x) + 0,25p/\beta^4 D_\beta \quad (7)$$

для первой (центральной, конечной длины) части трубы и

$$w_2 = e^{-\beta(x-0,5a)}[C_5 \cos\beta(x-0,5a) + C_6 \sin\beta(x-0,5a)] \quad (8)$$

для второй (правой, полубесконечной длины) ее части; C_1-C_6 — неизвестные коэффициенты; $0,25p/\beta^4 D_\beta$ — частное решение уравнения (3).

Учитывая, что $w_1(x) = w_2(-x)$, находим, что $C_3 = C_1$, $C_4 = -C_2$.

Из условия равенства прогибов, углов поворота стенки, моментов и перерезывающих сил оболочек 1, 2 в точке $x = 0,5a$, определим C_1 и C_2 :

$$C_1 = -p \frac{1}{8\beta^4 D_\beta k}; \quad C_2 = p \frac{\text{tg}(0,5\beta a)}{8\beta^4 D_\beta k},$$

где $k = (\cos 0,5\beta a + \text{tg} 0,5\beta a \sin 0,5\beta a)e^{0,5\beta a}$.

Тогда

$$w_1 = \frac{p}{8\beta^4 D_\beta k} [e^{-\beta x}(-\cos\beta x + \text{tg} 0,5\beta a \sin\beta x) + e^{\beta x}(-\cos\beta x - \text{tg} 0,5\beta a \sin\beta x) + 2k]. \quad (9)$$

Максимальные кольцевые напряжения (при $x = 0$) $\sigma_{\beta \max}$ в оболочке могут быть найдены по формулам [9]:

$$\sigma_{\beta \max} = N/h + 6\nu M/h^2; \quad N = -Ehw/R; \quad M = -D_\beta d^2 w/dx^2, \\ \sigma_{\beta \max} = \frac{pR}{hk} [1 - k - \frac{3\nu \text{tg} 0,5\beta a}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}] = pf(R, h, a), \quad (10)$$

где $f(R, h, a)$ — функция, определяемая только геометрическими параметрами трубы и схемы нагружения.

Для того, чтобы оценить возможности использования решения статической задачи для подбора параметров соответствующего динамического нагружения трубы, приведем следующие рассуждения.

1. Исходя из того, что выражение для статического максимального напряжения состоит из двух множителей: силового p и геометрического $f(R, h, a)$, предположим, что в динамической постановке структура выражения для максимального



динамического напряжения будет аналогичной (10):

$$\sigma_{\beta_{\max}}^d = A_d J_f(R, h, a), \quad (11)$$

где I — равномерно распределенный импульс давления при ОВз; A_d — некоторая функция, учитывающая динамику процесса и определяемая только свойствами ВВ;

2. Для достижения высокой эффективности ОВз необходимо создать динамические напряжения, равные динамическому пределу текучести.

Из (5), (11) с учетом сделанных допущений получим:

$$K\sigma_{\tau} = A_d J_f(R, h, a).$$

Обычно K и A_d неизвестны, поэтому полученное выражение можно записать в виде:

$$\sigma_{\tau} = A I f_f(R, h, a). \quad (12)$$

Учитывая возможные погрешности принятых выше допущений, для определения функции A будем использовать экспериментально полученную информацию об уже хорошо отработанном режиме с параметрами I_0, a_0 для некоторой трубы, которую назовем эталонной, с характеристиками $R_0, h_0, \sigma_{\tau_0}$:

$$\sigma_{\tau_0} = A I_0 f_f(R_0, h_0, a_0).$$

С учетом (10) запишем для эталонной трубы:

$$\sigma_{\tau_0} = \frac{A I_0 R_0}{h_0 k_0} \left[1 - k_0 - \frac{3vtg0,5\beta_0 a_0}{\sqrt{3(1-v^2)}} \right],$$

для исследуемой трубы:

$$\sigma_{\tau_i} = \frac{A I_i R_i}{h_i k_i} \left[1 - k_i - \frac{3vtg0,5\beta_i a_i}{\sqrt{3(1-v^2)}} \right]$$

и после соответствующих преобразований получим:

$$I_i = I_0 \frac{\sigma_{\tau_i} R_0 h_i}{\sigma_{\tau_0} R_i h_0} \left(\frac{k_i}{k_0} \frac{1 - k_0 - 3vtg0,5\beta_0 a_0 / \sqrt{3(1-v^2)}}{1 - k_i - 3vtg0,5\beta_i a_i / \sqrt{3(1-v^2)}} \right).$$

Отметим, что импульс давления I обратно пропорционален ширине заряда, прямо пропорционален массе заряда ВВ, приходящейся на единицу площади трубы, а масса заряда определяется выражением (4), т. е. $I \sim jn/a$, с учетом чего получим

$$n_i = n_0 \frac{j_0 a_i \sigma_{\tau_i} R_0 h_i}{j_i a_0 \sigma_{\tau_0} R_i h_0} \left(\frac{k_i}{k_0} \frac{1 - k_0 - 3vtg0,5\beta_0 a_0 / \sqrt{3(1-v^2)}}{1 - k_i - 3vtg0,5\beta_i a_i / \sqrt{3(1-v^2)}} \right). \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет рассчитывать непосредственно количество витков ДШ, необходи-

мое для эффективной ОВз кольцевых швов труб заданного типоразмера, а также определить оптимальный для конкретного случая ДШ по погонной навеске, которая бывает 6, 12, 14, 18, 33 г/м для промышленно выпускаемых шнуров [10].

Покажем, что полученное условие определения ширины заряда (2) позволяет упростить выражение (13). Обозначим часть этого выражения, заключенную в скобки, через φ :

$$\varphi = \left(\frac{k_i}{k_0} \frac{1 - k_0 - 3vtg0,5\beta_0 a_0 / \sqrt{3(1-v^2)}}{1 - k_i - 3vtg0,5\beta_i a_i / \sqrt{3(1-v^2)}} \right).$$

Подставим сюда значение ширины заряда, определяемое выражением (2): $a_0 = 0,75\pi/\beta_0, a_i = 0,75\pi/\beta_i$, тогда $\beta_0 a_0 = \beta_i a_i = 0,75\pi, k_0 = k_i$ для всех типоразмеров труб, в том числе и для эталонной, а это значит, что $\varphi = 1$ и выражение 13 принимает вид:

$$n_i = n_0 \frac{j_0 a_i \sigma_{\tau_i} R_0 h_i}{j_i a_0 \sigma_{\tau_0} R_i h_0}. \quad (14)$$

Расчет расстояния от оси шва до ближнего края заряда. Для определения этого параметра рассмотрим рис. 1. Расстояние от оси шва до ближнего края заряда должно быть равно ширине зоны пластических деформаций укорочения, возникающих при сварке. Воспользуемся хорошо известным расчетным способом определения ширины зоны пластических деформаций, предложенным Г. А. Николаевым [11]:

$$b_{\Pi} = \frac{B\rho}{\rho - \epsilon_{\tau}}, \quad \rho = \frac{0,484\alpha q_0}{c^*(x_1 + x_2 - 2B)}, \quad (15)$$

где B — ширина свариваемых пластин; ϵ_{τ} — деформация, соответствующая напряжениям, равным пределу текучести стали; α — коэффициент линейного расширения при нагреве; $q_0 = q/2vh$ — погонная энергия сварки; $q = \eta IU$ — эффективная мощность источника нагрева; η — КПД источника нагрева; I — сварочный ток; U — напряжение дуги; v — скорость сварки; c^* — теплоемкость стали в специфических условиях сварки, которая может быть принята равной теплоемкости при постоянном объеме; x_1, x_2 — положение точек сварного соединения на оси x , в которых температура при сварке T достигает 600 и 500 °С соответственно и рассчитывается по формуле Н. Н. Рыкалина [6] ($x = 0,484q_0/c^*T$). Напряжение дуги при ручной дуговой сварке (РДС) согласно ГОСТ 35-75 определяется по формуле $U = 20 + 0,04I$, сварочный ток устанавливается сварщиком; сварочный ток при полуавтоматической сварке определяется по амперметру



полуавтомата или по приведенной для РДС формуле в зависимости от напряжения дуги, фиксируемого вольтметром полуавтомата; сварочные параметры при автоматической сварке определяются по приборам автомата или источника питания.

В рассматриваемой Г. А. Николаевым модели сварного соединения считается, что действие термомодеформационных процессов при сварке распространяется на всю ширину свариваемых пластин, тогда как в реальном соединении величина упругих деформаций (образующихся при сварке и остаточных) быстро затухает по мере удаления от оси шва и реактивное действие деформациям и напряжениям, связанным с пластическим укорочением высоконагретого металла при сварке, оказывает лишь часть металла, прилегающая к зоне деформаций укорочения. В нашем случае ширина этой реактивной зоны (зоны остаточных упругих деформаций сжатия) определяется точкой *B* на рис. 1. Ширина этой зоны определена выше выражением (2). Подставляя (2) в (15), получим выражение для расчета ширины зоны пластических деформаций укорочения при сварке кольцевых соединений труб:

$$b_{II} = \frac{1,8\sqrt{Rh}}{1 - \frac{\sigma_T}{\alpha E} \left(\frac{1}{600} + \frac{1}{500} - 3,6 \frac{c^* \sqrt{Rh}}{0,484q_0} \right)} \quad (16)$$

Коэффициенты, отражающие свойства материала трубы, для низкоуглеродистых сталей имеют следующие средние значения в системе размерности СИ [11]:

$$c^* = 5,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3\text{C}, \alpha = 15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}, E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па.}$$

КПД источника нагрева η определяется экспериментально и является справочной величиной [7].

С учетом приведенных значений коэффициентов, а также того, что источник сварочного нагрева имеет физическую ширину и нагрев основ-

Таблица 1. Режимы ОВЗ кольцевых швов труб

№ п/п	Типоразмер труб (2R×h), мм	σ_T , МПа	n, витков ДШ-А (j = 12 г/м)	a, мм	b, мм
1	115×4	240	2	28	19
2	115×8	240	4	39	29
3	150×8	280	4	44	28
4	160×5	280	2	36	21
5	530×7	350	2	78	20
6	530×9	350	3	88	22
7	720×17,2	440	9,8/8	142/140	19/40
8	168×14	280	10	62	25

ного металла осуществляется фактически от линии сплавления, окончательное выражение для определения расстояния от оси шва до ближнего края заряда ВВ при РДС примет вид:

$$b = \frac{1,8\sqrt{Rh}}{1 - 1,53 \cdot 10^{-9} \sigma_T \left(1 - 11,3 \cdot 10^9 \frac{\sqrt{Rh}}{q_0} \right)} + S_{ш}, \quad (17)$$

где $S_{ш}$ — половина ширины кольцевого шва. В случае многопроходной сварки ширина зоны пластических деформаций определяется проходом с наибольшим q_0 , сварочные параметры которого и должны быть приняты для расчета. Чаще всего таковым является последний проход.

Для проверки предложенного способа расчета режимов ОВЗ кольцевых швов труб в качестве эталонной приняли трубу класса прочности X46 японской поставки со следующими параметрами: радиус $R = 0,36$ м, толщина стенки $h = 0,0172$ м, $\sigma_T = 440 \cdot 10^6$ Па, $S_{ш} = 0,009$ м, количество витков ДШ с погонной навеской $12 \cdot 10^{-3}$ кг/м — 8, общая ширина навивки заряда — 0,14 м. Приведенный режим обработки этой трубы отрабатывался при разработке технологии ОВЗ для Оренбургского газоконденсатного месторождения. С учетом этого выражение (14) примет вид:

$$n_i = 0,033 \cdot 10^{-6} \sigma_T a_i h_i / j_i R_i$$

Учитывая, что в эталонной трубе после ОВЗ ОН не стали равны нулю, а составляли 80 МПа (результаты приведены ниже), а также имеющийся опыт ОВЗ кольцевых швов, численный коэффициент примем равным $0,04 \cdot 10^{-6}$ и окончательно запишем выражение для определения количества витков ДШ в виде:

$$n_i = 0,04 \cdot 10^{-6} \sigma_T a_i h_i / j_i R_i \quad (18)$$

Для проверки эффективности предложенной методики провели контрольные эксперименты по расчетным режимам, представленным в табл. 1, результаты измерения напряжений приведены в табл. 2. Измерение напряжений проводили с помощью известного способа разрушающей тензометрии с использованием деформометра с ценой деления шкалы индикатора 2 мкм. В строке 7 табл. 1 в числителе даны режимы ОВЗ эталонной трубы, рассчитанные по разработанному методу, в знаменателе — режимы, по которым проводилась реальная ОВЗ (до разработки метода расчета).

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что ОВЗ улучшила напряженное состояние не только некоторых отдельно взятых образцов, но и в среднем по всем образцам, использованным в данной серии экспериментов. Кроме того, результаты снижения ОН достаточно



Таблица 2. Результаты экспериментальной проверки метода расчета

№ п/п	Типоразмеры труб (D×h), мм	Остаточные напряжения, МПа		
		$\sigma_{и}$, МПа	$\sigma_{к}$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа
1	115×4	150	-30	180
2	160×5	200	-50	250
3	115×8	200	-20	220
4	150×8	250	0	250
5	530×7	300	50	250
6	530×9	300	50	250
7	168×14	250	0	250
8	720×17,2	440	80	360

Примечание. $\sigma_{и}$ — исходные (после сварки) ОН; $\sigma_{к}$ — результирующие после ОВз ОН; $\Delta\sigma$ — величина снижения ОН (все приведенные значения напряжений относятся к наружной поверхности труб).

близки для всех испытанных образцов, в среднем для этой группы труб ОН снижены до нулевого уровня. Ни в одном из контрольных экспериментов не произошло недопустимых отклонений результатов, а именно, не было случаев неэффективной с точки зрения снижения ОН обработки, как и случаев чрезмерной деформации обрабатываемых труб. Остаточные прогибы труб в местах обработки не превышают допустимые [12, 13]. Это подтверждает пригодность разработанной ме-

тодики выбора режимов ОВз для практического применения.

1. Голиков Н. И. Оценка состояния сварных соединений трубопроводов Севера: Дис. ... канд. техн. наук. — Якутск, 2000. — 140 с.
2. Перунов Б. В., Кушнарченко В. М. Профилактика коррозии — гарантия эффективности. — Челябинск: Южно-Урал. кн. изд-во, 1983. — 63 с.
3. Пономарева И. Н. Остаточные сварочные напряжения при многопроходной сварке стыков трубопроводов // Свароч. пр-во. — 2009. — № 1. — С. 7–11.
4. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике. — Киев: Наук. думка, 2005. — 753 с.
5. Брызгалин А. Г. Снижение остаточных сварочных напряжений в кольцевых швах трубопроводов обработкой взрывом: Дис. ... канд. техн. наук. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2006. — 135 с.
6. Определение параметров заряда взрывчатого вещества для снятия остаточных напряжений в кольцевых швах / В. М. Кудинов, В. Г. Петушков, Н. В. Березина и др. // Автомат. сварка. — 1975. — № 9. — С. 63–65.
7. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций // Напряженное состояние в районах кольцевых стыков труб при обработке взрывом. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 291–296.
8. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. — М.: Физматгиз, 1963. — 635 с.
9. Работнов Ю. Н. Сопrotивление материалов. — М.: Физматгиз, 1962. — 456 с.
10. Перечень рекомендуемых промышленных взрывчатых материалов, приборов взрывания и контроля. — М.: Недра, 1987. — 60 с.
11. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М. Напряжения и деформации при сварке. — Киев: Вища шк., 1987. — 246 с.
12. ГОСТ 20295–74. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов.
13. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. — М.: Госкомстрой, 1985.

Поступила в редакцию 01.04.2013

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

В ИЭС им. Е.О. Патона разработаны технологии сварки трением металлов и сплавов в однородном и разнородном сочетаниях, в том числе:

- инструментальных сталей с конструкционными (составной концевой металлорежущий инструмент);
- коррозионно-стойких сталей с конструкционными (валы химических насосов, ролики отделочных машин текстильного производства);
- жаропрочных сплавов с конструкционными сталями (биметаллические клапаны двигателей автомобилей, роторы турбокомпрессоров дизелей);
- легированных высокопрочных сталей с углеродистыми равного и неравного сечения (корпуса гидроцилиндров, шток-поршни, валы);
- алюминия и его сплавов со сталью и медью (биметаллические переходники);
- композиционных материалов и металлокерамики с медью (контакты электроаппаратуры);
- меди, бронзы и латуни со сталью (блоки цилиндров аксиально-поршневых гидромашин).



Биметаллические переходники

Сварные элементы автотракторной техники